

- 1.ДБН В.1.1-7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – К.: Держбуд України, 2003.
- 2.ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ Пожарная безопасность. Общие требования.
- 3.Метрологическое обеспечение безопасности труда: Справочник / Под ред. И.Х. Солодяна. Т.1. Измеряемые параметры физических опасных и вредных производственных факторов. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 174 с.
- 4.ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
- 5.Иличкин В.С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов. Принципы и методы определения. – СПб.: Химия, 1993. – 136 с.
- 6.Руководство к практическим занятиям по гигиене труда / Под. ред. А.М.Шевченко. – К., 1986.
- 7.Судебно-медицинская экспертиза. – 1979. – № 2. – С.21-25.

Отримано 11.05.2005

УДК 628.174 : 614.4

В.П.ОЛЬШАНСКИЙ, д-р физ.-матем. наук, С.В.ОЛЬШАНСКИЙ

Академия гражданской защиты Украины, г.Харьков

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДИНАМИКИ СВОБОДНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СТРУИ

Получены формулы для расчета таких условий истечения свободной гидравлической струи, при которых ее траектория проходит через заданную точку пространства, а частицы жидкости в этой точке имеют заданную скорость движения.

Гидравлические струи используют в пожарном деле, при поливе растений, при мойке улиц, дезактивации специальной техники и др. С целью повышения точности доставки жидкости к месту назначения методом метания изучают баллистику свободных струй. Для описания траекторий используют решения дифференциальных уравнений движения материальной точки [1-3]. При этом решают как задачи анализа, так и задачи синтеза. Наметилось два направления в решении задач синтеза траекторий. Первое связано с применением специальной функции Ламберта и программного компьютерного обеспечения в среде «Maple» [4, 5]. Второе отличается от первого тем, что определение параметров истечения струи сводится к решению трансцендентного уравнения или их системы традиционными методами (итераций, дихотомии и др.) [3]. При этом, ввиду небольшого объема вычислений, часто решение обратной задачи удается получить даже без привлечения компьютера. Итак, решение обратной динамической задачи позволяет повысить эффективность использования гидравлических струй, т.е. имеет важное практическое значение.

До настоящего времени рассматривались в основном задачи геометрического синтеза, где определялись такие условия истечения

струи, при которых ее траектория удовлетворяет некоторым ограничениям геометрического характера, например, проходит через одну или две заданные точки пространства, попадает в заданный отрезок и др. [3-5]. На практике могут выдвигаться ограничения и физического характера. Так, для эффективного пожаротушения требуется, чтобы частицы огнетушащих веществ достигали фронта пламени со скоростью, превышающей определенное значение, т.е. имели определенный уровень кинетической энергии [6]. Но в случае попадания струи на горящую поверхность с большой скоростью будет большой сила гидродинамического воздействия струи на преграду, что нежелательно с позиций разрушения поверхности. Поэтому приходится вводить двухстороннее ограничение на скорость. Приближенно его можно реализовать заданием величины скорости. В связи с этим далее ставится следующая задача синтеза: нужно определить такие условия истечения свободной гидравлической струи, при которых ее траектория проходит через фиксированную точку пространства, а частицы жидкости в этой точке имеют заданную величину скорости движения.

Поставленную задачу решим на базе двух моделей: без учета и с учетом сопротивления воздушной среды. Решение, полученное на основе упрощенной модели, служит начальным приближением к уточненному решению, которое приходится строить численно для конкретных исходных данных. Во втором случае, из-за некорректности обратной задачи, могут возникать трудности вычисления корней трансцендентных уравнений, когда они расположены близко к границам области определения функции или близко друг к другу.

Аналитическое решение задачи синтеза без учета аэродинамического сопротивления потоку жидкости. Его построим из методологических соображений, чтобы осветить вопрос существования и единственности решения поставленной обратной задачи.

Без учета действия аэродинамического сопротивления, траектория стационарной гидравлической струи описывается выражением [3]

$$y(x) = \frac{x}{v_1} \left(v_2 - \frac{g}{2} \cdot \frac{x}{v_1} \right). \quad (1)$$

Здесь v_1, v_2 – проекции скорости истечения струи из насадка ствола на координатные оси прямоугольной системы, показанной на рисунке; g – ускорение свободного падения.

Проекции скорости связаны с начальным напором H и углом наклона оси ствола к горизонту θ_0 соотношениями

$$v_1 = \sqrt{2gH} \cdot \cos \theta_0; \quad v_2 = \sqrt{2gH} \cdot \sin \theta_0.$$

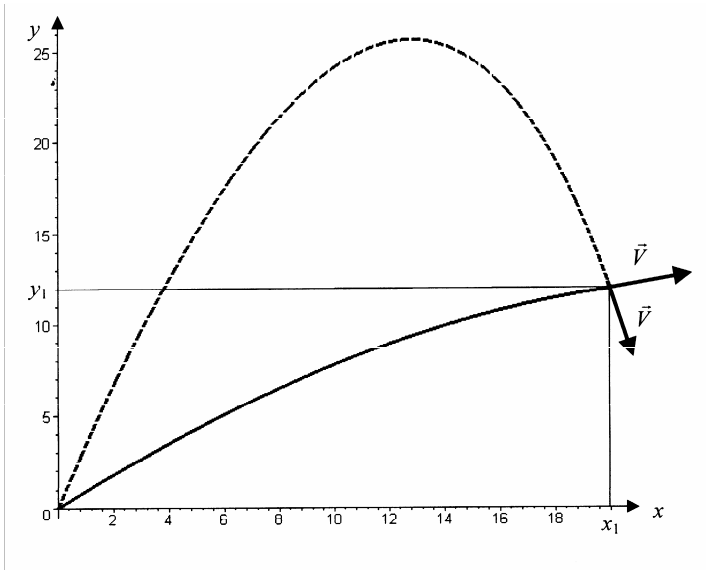
Квадрат скорости частицы жидкости $v^2(x)$ зависит от абсциссы x и эта зависимость имеет вид

$$v^2(x) = v_1^2 + \left(v_2 - \frac{gx}{v_1} \right)^2. \quad (2)$$

Полагая в (1) и (2) $x = x_1$, $y(x_1) = y_1$, $v^2(x_1) = V^2$, приходим к системе нелинейных уравнений

$$\begin{cases} v_2 t_1 - \frac{1}{2} g t_1^2 = y_1; \\ v_1^2 + \left(v_2 - g t_1 \right)^2 = V^2, \end{cases} \quad (3)$$

в которой $t_1 = x_1 v_1^{-1}$.



Две траектории, удовлетворяющие условию обратной задачи

Исключив в системе (3) параметр t_1 , получаем соотношение

$$v_1^2 + v_2^2 = 2gH = 2gy_1 + V^2. \quad (4)$$

Далее рассмотрим три варианта задачи синтеза. В первом варианте нужно вычислить параметры истечения струи H и θ_0 при заданных x_1, y_1, V .

Решая систему (3) относительно v_1 , с учетом (4), получаем

$$v_1 = \left\{ \frac{x_1^2 \cdot (gy_1 + V^2)}{2 \cdot (x_1^2 + y_1^2)} \cdot \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{g^2 \cdot (x_1^2 + y_1^2)}{(gy_1 + V^2)^2}} \right] \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

Знак «+» соответствует попаданию в точку (x_1, y_1) на восходящем участке траектории, а знак «-» – на нисходящем (соответственно сплошная и пунктирная кривые на рисунке).

Из формулы (5) вытекает, что поставленная задача разрешима, когда

$$V \geq \sqrt{g \left(\sqrt{x_1^2 + y_1^2} - y_1 \right)},$$

причем в случае знака равенства она имеет единственное решение.

Учитывая (4) и (5), для вычисления напора и угла наклона оси ствола получаем выражения:

$$H = y_1 + \frac{V^2}{2g}; \quad \theta_0 = \arccos \left(\frac{v_1}{\sqrt{2gH}} \right). \quad (6)$$

Характерно, что величина напора не зависит от параметров x_1 и θ_0 . Но при одном и том же H имеем два значения v_1 , а следовательно, и θ_0 . Итак, в первом варианте задачи синтеза имеем два решения, отличающиеся только углом наклона ствола к горизонту.

Вычислим, какими будут H и θ_0 при $x_1 = 20$ м; $y_1 = 12$ м; $V = 15$ м/с. Приняв знак «+» в формуле (5), получаем $v_1 \approx 14,826$ м/с. Согласно (6), ему соответствует: $H \approx 23,468$ м; $\theta_0 \approx 46,296^\circ$. Если принять знак «-», то $v_1 \approx 5,674$ м/с; $H \approx 23,468$ м; $\theta_0 \approx 74,667^\circ$. Непосредственной подставкой можно убедиться, что оба решения удовлетворяют системе (3).

Во втором варианте задачи синтеза определим параметры x_1 и H , считая заданными θ_0, y_1 и V . Необходимый напор, как прежде, нахо-

дим с помощью первой формулы в (6). Для вычисления x_1 из системы (3) получаем выражение

$$x_1 = \frac{(V^2 + 2gy_1)\sin(2\theta_0)}{2g} \cdot \left(1 \mp \sqrt{1 - \frac{2gy_1}{(V^2 + 2gy_1)\sin^2 \theta_0}} \right). \quad (7)$$

Здесь также при одном и том же H имеем два значения x_1 , соответствующие попаданию траектории в точку (x_1, y_1) на восходящем и нисходящем участках.

Условием разрешимости второго варианта обратной задачи является

$$V \geq \sqrt{2gy_1} \operatorname{ctg} \theta_0.$$

В случае знака равенства ее решение единственно.

Вычислим H и x_1 при $\theta_0 = 46,296$; $y_1 = 12$ м; $V = 15$ м/с. Согласно первой формуле в (6) $H \approx 23,468$ м. Для x_1 по формуле (7) получаем $x_1 \approx 20,000$ м и $x_1 \approx 26,887$ м. Первое значение x_1 согласуется с тем, что было в первой задаче.

Третий вариант задачи синтеза состоит в определении параметров истечения θ_0 и x_1 по заданным H , y_1 и V . При произвольном задании H обратная задача решений не имеет. Напор должен быть таким, чтобы выполнялось первое равенство в (6). Тогда третий вариант задачи синтеза имеет бесчисленное множество решений, у которых произвольно либо θ_0 либо x_1 , а связь между ними представлена выражением (7).

Численное решение обратной задачи с учетом аэродинамического сопротивления воздуха. В рамках теории линейного сопротивления потоку траектория стационарной струи описывается выражением [3]

$$y(x) = \frac{g + \alpha v_2}{\alpha} \frac{x}{v_1} + \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x}{v_1} \right). \quad (8)$$

Здесь α – приведенный коэффициент аэродинамического сопротивления.

Квадрат скорости движения жидкости зависит от абсциссы x и подается выражением

$$v^2(x) = v_1^2 \left(1 - \frac{\alpha x}{v_1} \right)^2 + \left[v_2 \left(1 - \frac{\alpha x}{v_1} \right) - \frac{gx}{v_1} \right]^2. \quad (9)$$

По условию обратной задачи $y(x_1) = y_1$, $v^2(x_1) = V^2$. Поэтому, согласно (8) и (9)

$$\begin{cases} y_1 = \frac{g + \alpha v_2}{\alpha^2} (1 - z) + \frac{g}{\alpha^2} \ln z; \\ V^2 = v_1^2 z^2 + \left[v_2 z - \frac{g}{\alpha} (1 - z) \right]^2. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь $z = 1 - \alpha x_1 v_1^{-1}$.

Система (10) является обобщением системы (3). Ее решение зависит от постановки задачи синтеза.

В первом варианте задачи, как прежде, определяем параметры H и θ_0 по заданным x_1 , y_1 , V и α . Из второго выражения в (10) определяем v_2 и подставляем в первое выражение. В результате получаем трансцендентное уравнение для вычисления z .

$$\frac{1 - z}{z} + \ln z \pm \frac{\alpha V}{g} \sqrt{\left(\frac{1}{z} - 1 \right)^2 - \left(\frac{\alpha x_1}{V} \right)^2} - \frac{\alpha^2 y_1}{g} = 0. \quad (11)$$

Знак «+» соответствует прохождению траектории через заданную точку на восходящем участке, а знак «-» – на нисходящем.

Интервалом изоляции корня уравнения (11) является

$$0 < z \leq \left(1 + \frac{\alpha x_1}{V} \right)^{-1}.$$

Последующий расчет сводится к применению формул:

$$v_1 = \frac{\alpha x_1}{1 - z}; \quad v_2 = \frac{1}{z} \left[\frac{g}{\alpha} (1 - z) \pm \sqrt{V^2 - v_1^2 z^2} \right];$$

$$H = \frac{1}{2g} \cdot (v_1^2 + v_2^2), \quad \theta_0 = \arctg \left(\frac{v_2}{v_1} \right).$$

Результаты расчетов при $x_1 = 20$ м; $y_1 = 12$ м; $V = 15$ м/с и разных α представлены в табл.1, 2. Корень z вычисляли методом дихотомии с точностью до 10^{-5} . Результаты в табл.1 соответствуют знаку «+» в уравнении (11), а в табл.2 они получены при знаке «-».

Анализ полученных численных результатов показывает, что с увеличением α уменьшается θ_0 и возрастает H . Изменение α в

большей степени влияет на расчетный напор H .

Таблица 1 – Результаты расчета при знаке «+» в уравнении (11)

α , с ⁻¹	z	v_1 , м/с	v_2 , м/с	H , м	θ_0 , град.
0,01	0,98669	15,022	15,576	23,866	46,038
0,05	0,93665	15,785	15,974	25,705	45,342
0,10	0,88058	16,747	16,419	28,035	44,433
0,15	0,83058	17,708	16,886	30,516	43,639
0,20	0,78576	18,670	17,356	33,119	42,911
0,25	0,74533	19,633	17,832	35,853	42,248
0,30	0,70870	20,598	18,310	38,711	41,635

Таблица 2 – Результаты расчета при знаке «-» в уравнении (11)

α , с ⁻¹	z	v_1 , м/с	v_2 , м/с	H , м	θ_0 , град.
0,01	0,96521	5,748	20,924	23,998	74,638
0,05	0,83501	6,061	21,856	26,219	74,500
0,10	0,69121	6,477	23,114	29,367	74,346
0,15	0,56653	6,921	24,483	32,995	74,216
0,20	0,45892	7,393	25,993	37,222	74,124
0,25	0,36648	7,892	27,671	42,202	74,081
0,30	0,28740	8,420	29,570	48,179	74,106

При решении второго варианта задачи синтеза, как прежде, определяем H и x_1 , считая известными θ_0 , y_1 , V и α . В этом случае проекции скорости истечения жидкости связаны соотношением $v_1 = \varepsilon v_2$, где $\varepsilon = \operatorname{ctg} \theta_0$. Разрешив второе уравнение в (10) относительно v_2 и подставив в первое, приходим к трансцендентному уравнению

$$\eta + \ln(1 - \eta) + \frac{\eta}{(1 - \eta)(1 + \varepsilon^2)} \cdot \left[\eta \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha V}{g}\right)^2 (1 + \varepsilon^2) - (\varepsilon \eta)^2} \right] - \frac{\alpha^2 y_1}{g} = 0. \quad (12)$$

Определив с заданной точностью его корень, затем легко найти и остальные параметры, поскольку

$$v_2 = \frac{\eta}{\alpha(1 - \eta)(1 + \varepsilon^2)} \left[\eta \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha V}{g}\right)^2 (1 + \varepsilon^2) - (\varepsilon \eta)^2} \right]; \quad v_1 = \varepsilon v_2;$$

$$x_1 = v_1 \eta \alpha^{-1}; \quad H = \frac{1}{2g} \cdot (v_1^2 + v_2^2).$$

Знак «+» соответствует прохождению траектории заданной точки на восходящем участке, а знак «-» – на нисходящем.

Интервалом изоляции корня уравнения (12) является

$$0 < \eta \leq \frac{\alpha V}{g \cos \theta_0}.$$

Результаты вычисления корней уравнения (12) и других параметров представлены в табл.3, 4. Неизвестное η вычисляли методом дихотомии с точностью до 10^{-5} . Числа в табл.3 соответствуют знаку «+» в уравнении (12), а в табл.4 – знаку «-». В расчетах принимали $y_1 = 12$ м; $V = 15$ м/с, а значения α и θ_0 – теми, что указаны в таблицах. Наблюдается хорошее соответствие между численными решениями первого и второго вариантов задачи синтеза.

Таблица 3 – Результаты расчета при знаке «+» в уравнении (12)

$\alpha, \text{с}^{-1}$	$\text{ctg } \theta_0$	η	$v_2, \text{м/с}$	$H, \text{м}$	$x_1, \text{м}$
0,1	1,0199	0,11940	16,419	28,034	19,994
0,2	1,0757	0,21418	17,354	33,111	19,991
0,3	1,1250	0,29132	18,310	38,714	20,003

Таблица 4 – Результаты расчета при знаке «-» в уравнении (12)

$\alpha, \text{с}^{-1}$	$\text{ctg } \theta_0$	η	$v_2, \text{м/с}$	$H, \text{м}$	$x_1, \text{м}$
0,1	0,2802	0,30879	23,114	29,367	19,999
0,2	0,2844	0,54108	25,992	37,219	19,999
0,3	0,2848	0,71259	29,569	48,177	20,003

Решая третий вариант задачи синтеза, покажем, как вычислить θ_0 и x_1 при заданных H, y_1, V и α .

Учитывая, что $v_1^2 = 2gH - v_2^2$, из второго выражения (10) получаем

$$v_2 = \frac{\alpha}{2gz \cdot (1-z)} \cdot \left[2gHz^2 + \frac{g^2}{\alpha^2} (1-z)^2 - V^2 \right].$$

Подставляя это значение v_2 в первое выражение (10), приходим к трансцендентному уравнению с неизвестным z

$$1 - z + \ln z + \frac{\alpha^2}{2g^2 z} \left[2gHz^2 + \frac{g^2}{\alpha^2} (1-z)^2 - V^2 \right] - \frac{\alpha^2 y_1}{g} = 0.$$

После вычисления z и v_2 с заданной точностью, остальные параметры легко найти по формулам:

$$\theta_0 = \arcsin \frac{v_2}{\sqrt{2gH}}; \quad x_1 = \frac{1-z}{\alpha} \sqrt{2gH - v_2^2}.$$

Результаты численного решения третьего варианта задачи синтеза представлены в табл.5. Расчет проводился при $y_1 = 12$ м; $V = 15$ м/с и тех α и H , что указаны в табл.5.

Таблица 5 – Расчетные значения параметров в третьем варианте обратной задачи

$\alpha, \text{с}^{-1}$	$H, \text{м}$	z	$v_2, \text{м/с}$	$\theta_0, \text{град.}$	$x_1, \text{м}$
0,1	28,035	0,88056	16,418	44,430	20,003
0,1	29,367	0,69120	23,114	74,348	19,998
0,2	33,119	0,78568	17,351	42,897	20,011
0,2	37,222	0,45894	25,992	74,112	20,014
0,3	38,711	0,70872	18,311	41,638	19,998
0,3	48,179	0,28742	29,568	74,093	20,015

Полученные численные результаты согласуются с теми, что были в первом варианте задачи синтеза. При учете аэродинамического сопротивления третья задачи синтеза имеет конечное число решений. В этом проявляется качественное отличие уточненной модели движения от предыдущей упрощенной, где не учитывалось сопротивление потоку жидкости.

Исследование показало, что есть три возможности, изменяя два параметра истечения струи, достичь того, чтобы ее траектория проходила через заданную точку, а частицы жидкости имели там заданную величину скорости движения.

Учет силы аэродинамического сопротивления потоку жидкости существенно влияет на результаты численного решения обратной задачи баллистики струи.

1.Севриков В.В. Карпенко В.А., Севриков И.В. Автоматические быстродействующие системы пожарной защиты. – Севастополь: СевГТУ, 1996. – 260 с.

2.Куценко Л.М., Бобов С.В., Росоха С.В. Методы геометричного моделирования в задачах пожарной безопасности. – Харків: АЦЗУ, 2004. – 175 с.

3.Ольшанский В.П., Халыпа В.М., Дубовик О.А. Приближенные методы расчета гидравлических пожарных струй. – Харьков: Митець, 2004. – 116 с.

4.Рева Г.В., Куценко Л.М., Росоха С.В. Анімаційне комп'ютерне моделювання деяких процесів в задачах пожарной безопасности // Проблемы пожарной безопасности. Юбилейный выпуск. – Харьков: АПБУ, 2003. – С.147-163.

5.Запольский Л.Л. Моделирование траекторий доставки засобів пожежогасіння методом метання // Геометричне та комп'ютерне моделювання. Вип.5. – Харків: ХДУХТ, 2004. – С.106-113.

6.Севриков В.В. Автономная автоматическая противопожарная защита промышленных сооружений. – Киев-Донецк: Вища школа, 1979. – 188 с.

Получено 12.04.2005

УДК 355

Н.И.АДАМЕНКО, канд. техн. наук

Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры

ТРИ РЕЖИМА ВЫТЕКАНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ РЕЗЕРВУАРА АВТОМАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПОЖАРОТУШЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ГАЗА

Показано, что возможны три режима вытекания жидкости из резервуара установок автоматического пожаротушения, которые соответственно названы: «Выстрел», «Выстрел с Подпором» и «Выстрел с Продолжением». Для реализации последнего режима в верхнюю часть резервуара монтируется клапан, который открывается, когда давление в резервуаре оказывается ниже атмосферного. Показано, что клапан позволяет за относительно короткое время в режиме «Выстрел с Продолжением» обеспечить расход жидкости существенно больший, чем в режимах «Выстрел» и «Выстрел с Подпором».

Настоящая работа посвящена проблеме взрывопожарной безопасности складов промышленных взрывчатых веществ, актуальность которой для Украины не вызывает сомнений.

Для предотвращения развития взрывопожарных чрезвычайных ситуаций используется широкий спектр методов пожаротушения, в том числе и с применением автоматических установок пожаротушения [1, 2].

В работах [3, 4] описывалась новая автоматическая установка пожаротушения, предназначенная для тушения пожаров на взрывоопасных объектах. Различные режимы работы данной установки показаны далее.

Рассмотрим вытекание жидкости из резервуара по цилиндрической трубе с радиусом a и длиной L , один конец которой вмонтирован в нижнюю часть резервуара, а другой выведен в атмосферу. В начальный момент времени $t = 0$ в верхней части резервуара находился газ, который занимал объем $V_{г.н.}$ и имел давление P_n , а нижняя часть резервуара была заполнена жидкостью, которая занимала объем $V_{ж.н.}$

Если P_n больше атмосферного давления P_a , то при $t > 0$ жидкость под действием перепада давлений начнет вытекать из резервуара по трубе в атмосферу. Как показано в [4], система уравнений, описывающая такое вытекание жидкости, существенно упрощается, если время